

## **ESTRUTURA DO PROJETO DE PESQUISA**

### **1. Título:**

Otimização topológica aplicada a estruturas na engenharia civil.

### **2. Área (s)/Linha (s) de Pesquisa contempladas (homologadas no CONEPE):**

- Engenharia civil.
- Análise estrutural.
- Otimização estrutural e redução de custos.

### **3. Resumo (no máximo 300 palavras):**

Na atualidade, os projetos de engenharia envolvem a criação de produtos novos e sofisticados. O desenvolvimento destes produtos requer o auxílio de ferramentas computacionais com base científica bem estabelecida. O crescimento do poder computacional tem viabilizado a solução de problemas numéricos de grande porte; sendo este crescimento fortemente impulsionado pelo avanço de métodos computacionais de alta performance, que fazem possível a aplicação de métodos numéricos, tais como: o método dos elementos finitos; método dos elementos de contorno; método das diferenças finitas, métodos sem malha, entre outros. Existe também uma forte competição tecnológica a qual requer redução de tempos de análise, com maior funcionalidade e qualidade dos resultados. A otimização estrutural visa este fim, levando a uma estrutura ótima para condições pré-determinadas, mantendo tempos de análise e custos baixos. A otimização estrutural tem apresentado resultados satisfatórios em áreas como a construção civil, projeto mecânico, indústria automobilística e aeroespacial, entre outras. A otimização topológica estrutural consiste em encontrar a melhor distribuição de material dentro de um domínio específico de projeto, este processo é realizado levando em consideração o comportamento mecânico da estrutura, tal como rigidez, deformação, frequências naturais, entre outros; assim como o de atender certas restrições como tensão máxima, deslocamento máximo, volume máximo ou modos de vibração. A função predominante de análise é a minimização de custos na etapa de construção, este fato é resultado da minimização do peso total dos componentes estruturais, por exemplo. O presente projeto visa a aplicação de métodos de otimização topológica a problemas reais da engenharia civil. Para este fim, será utilizado o método dos elementos finitos, o qual auxiliará na etapa da análise do comportamento mecânico. Diversos

exemplos e estudos de caso serão apresentados para mostrar a viabilidade da aplicação da metodologia desenvolvida.

#### **4. Palavras chave (no mínimo 3; no máximo 5):**

Otimização topológica; otimização estrutural; redução de custos; método dos elementos finitos; engenharia civil.

#### **5. Introdução:**

Desde tempos remotos, as estruturas e os métodos construtivos vêm sofrendo transformações paralelas a evolução das sociedades, frente a isso o campo da engenharia vem se desenvolvendo com a preocupação voltada para a economia dos recursos. A construção civil é um dos setores que mais utiliza materiais provenientes da natureza, assim, o seu impacto ao meio ambiente é intensificado devido ao pensamento primário de que os recursos naturais são ilimitados. Devido ao nível alto de competitividade, reduzir custos e obter resultados ótimos é o desafio do mercado atual. Com esse intuito, a área estrutural busca encontrar modelos que se adequem as necessidades do projeto, otimizando seu custo-benefício de forma que possam distribuir melhor os esforços e eliminar as regiões menos solicitadas de peças estruturais.

Métodos computacionais de simulação auxiliam na representação do comportamento mecânico-estrutural de sistemas. Permitindo aos engenheiros avaliar o desempenho dos projetos ainda no estágio de concepção, reduzindo significativamente custos envolvidos na execução de protótipos (Rodríguez, 2015).

Em suma, existe uma forte competição tecnológica a qual requer redução de tempos de análise, com maior funcionalidade e qualidade dos resultados. Métodos computacionais em conjunto com a otimização estrutural ajudam na realização deste fim, levando a uma estrutura ótima para condições pré-fixadas, mantendo tempos de análise e custos baixos sem perder a qualidade dos resultados. A otimização estrutural tem apresentado resultados satisfatórios em áreas como a construção civil, projeto mecânico, indústria automobilística e aeroespacial, entre outras. O presente trabalho visa o estudo de diversos métodos de otimização topológica. Segundo Filho (2015, p. 10), a otimização topológica busca obter uma melhor configuração para um conjunto de variáveis que descrevem um problema, esse processo utiliza de formulações

matemáticas para avaliar a melhor solução a ser adotada, assim sendo, as condições que limitam a escolha são as restrições que estabelecem qual critério adotar. Dentre os métodos de otimização topológica estrutural, encontra-se o método evolucionário de otimização estrutural ESO (Evolutionary Structural Optimization), assim como, o método de algoritmos genéticos. Estes métodos serão foco de estudo no presente projeto, os quais estão melhor detalhados na seção do referencial teórico. Os métodos de otimização topológica implementados serão aplicados a estruturas reais encontradas em projetos estruturais dentro da engenharia civil. O principal objetivo será a redução de peso da estrutura, assim como, a redução em tempo de análise computacional. Aplicações e estudos de caso serão apresentados para mostrar a viabilidade da aplicação da metodologia proposta.

## **6. Objetivos Gerais:**

- Redução de custos de estruturas convencionais, a partir do método de otimização topológica;
- Desenvolvimento de metodologias de otimização para diversos tipos de estruturas bidimensionais;
- Obter estruturas mais leves que atendam às necessidades e restrições iniciais;
- Validação das metodologias mediante o uso de estudos de casos e comparação com resultados da literatura;

## **7. Objetivos Específicos:**

- Verificar e analisar a relação entre custo e benefício do dimensionamento de seções de vigas otimizadas perante os métodos convencionais;
- Demonstrar a viabilidade da otimização de seções transversais de vigas;
- Implementação do método dos algoritmos genéticos;
- Implementação do método de Otimização Estrutural Evolucionária (ESO);
- Implementação do método dos elementos finitos (MEF) para treliças e vigas;
- Demonstrar a eficácia computacional dos métodos de otimização estrutural;
- Aplicação de métodos de otimização topológica a casos reais de estruturas treliçadas, vigas e pilares.

- Deixar um vínculo para o desenvolvimento futuros trabalhos.

## **8. Justificativa:**

Nos últimos tempos, os problemas da engenharia têm se tornado mais complexos, dificultando a aplicação de métodos analíticos para a solução dos mesmos, surgindo a necessidade do uso de novas ferramentas. A evolução do poder computacional tem viabilizado a aplicação de métodos numéricos mais sofisticados, visando a redução de custos e tempo no processo de construção de elementos estruturais. A otimização topológica estrutural possibilita obter esses resultados, mantendo o desempenho, assim como a qualidade funcional. A otimização tem sido uma ferramenta bastante utilizada na engenharia civil, em especial na área estrutural, pois ao se executar qualquer elemento é fundamental que este tenha o melhor desempenho, com um menor custo possível. Este trabalho tem como objetivo principal demonstrar métodos para otimização topológica estrutural visando a redução de custos e tempo, além de manter a qualidade funcional da estrutura, sempre em conformação com as normas já existentes. A partir desses resultados, será estabelecido comparações com estruturas desenvolvidas por métodos tradicionais, fundamentando-se assim a importância da otimização.

## **9. Resultados Esperados:**

Espera-se a implementação de um programa computacional robusto para a análise estrutural de tensões e deformações mediante o uso do MEF. Assim como, a implementação de métodos de otimização topológica. De forma geral, espera-se encontrar estruturas de menor peso que consigam cumprir as condições prévias de construção e falha. Espera-se também a publicação de artigos relevantes através da divulgação de resultados.

## **10. Hipóteses ou Questões Problemas:**

Alguns problemas incluem:

1. Dificuldade de análise de deformações e tensões em elementos estruturais como treliças, vigas e pilares.
2. A análise correta e robusta de estruturas complexas, cada vez mais requisitadas em projetos de engenharia.

3. Alto custo computacional na análise das estruturas mencionadas no ponto anterior.
4. Necessidade de otimização estrutural em termos de tempos de análise e variáveis de construção, como o peso total da estrutura.
5. Necessidade de uma metodologia que proporcione facilidade ao otimizar estruturas em projetos reais, dentro da engenharia civil.

## **11. Materiais e Métodos:**

O presente projeto não contempla o uso de materiais externos. A metodologia a ser usada inclui a aplicação do método dos elementos finitos para o cálculo de deslocamentos, deformações e tensões em estruturas. Serão aplicados métodos de otimização topológica à análise por elementos finitos para poder obter estruturas funcionais, que cumpra os mesmos requisitos das estruturas originais e estejam em conformação com as normas, mas impliquem em uma redução de custos de construção. Alguns métodos incluem, algoritmos genéticos, otimização evolucionária estrutural, otimização paramétrica, otimização linear, entre outros. As rotinas computacionais serão desenvolvidas usando o software comercial Matlab. Os resultados serão validados com a literatura existente e softwares comerciais. Posteriormente, a metodologia desenvolvida será aplicada a problemas reais dentro da engenharia civil, para poder mostrar a aplicabilidade.

## **12. Referencial Teórico:**

Os primeiros vestígios sobre a aplicação da otimização estrutural foram introduzidos por Maxwell (1872). No seu trabalho precursor ele buscava atingir o menor volume para estruturas uniaxiais sob a ação de diversos tipos de carregamento. Ele concluiu que uma estrutura ótima seria constituída por elementos de barra. Posteriormente, Michell (1904) aplicou a teoria desenvolvida por Maxwell a estruturas treliçadas, onde a finalidade era a obtenção de estruturas com menor peso. Os citados estudos não tiveram aplicação prática imediata pela falta do desenvolvimento de métodos numéricos adequados, assim como de ferramentas computacionais. Schmit (1960) e Fox (1965) popularizaram o uso de técnicas de otimização aplicadas a projetos de engenharia, porém a aplicação na prática era intuitiva e carecia ainda de uma base científico-matemática sólida. A perspectiva atual, de desenvolvimento tecnológico em aumento exponencial, tem viabilizado o uso de diferentes técnicas de otimização e aplicação a problemas reais na área de engenharia.

Existem vários tipos de otimização estrutural, um dos mais usados é o apresentado por Caballero (2012). Ele subdivide a otimização em quatro tipos: Paramétrica, de material, de forma e topológica.

Na otimização paramétrica, o objetivo é encontrar as dimensões ótimas de certos parâmetros da estrutura (Ex.: espessura, comprimento, seção transversal, largura, entre outros), de tal forma que o desempenho seja o melhor possível, Hakfta e Gurdal (1992).

Na otimização de material, o objetivo é encontrar a melhor distribuição de materiais diferentes, de tal forma a otimizar o comportamento de uma estrutura, Gil (2013).

Na otimização de forma, os contornos da estrutura são parametrizados mediante curvas suaves e definidas por variáveis de projeto. O objetivo é o de encontrar a melhor forma dos contornos, respeitando as restrições do problema.

Na otimização topológica, o objetivo é obter a distribuição ótima de material mediante a supressão de elementos, modificação da conectividade e a modificação de coordenadas nodais, Caballero (2012). Este último tipo de otimização combina as técnicas previamente mencionadas. Esta técnica pode achar a distribuição ótima dos materiais dentro do domínio predeterminado de projeto, Hakfta e Gurdal (1992). Este último tipo de otimização será o foco de aplicação do presente projeto.

Nos últimos anos, vários métodos foram desenvolvidos com o objetivo de conseguir estruturas ótimas usando técnicas de otimização topológica. O procedimento evolucionário é baseado na remoção simples e gradual de material ineficiente no domínio de projeto, a qual é fixa, pré-definida e discretizada utilizando a mesma aproximação usada na abordagem numérica escolhida, Cook *et al.* (2002). No caso do MEF se usará a mesma aproximação da malha de elementos finitos para a remoção dos elementos. A ideia básica do método ESO é realizar a análise mediante o MEF ao longo do domínio pré-fixado, após uma análise de sensibilidade, eliminar de forma gradual os elementos com menor eficiência no problema, Xie e Steven (1993). Os métodos evolucionários tentam encontrar a topologia final criando uma sequência evolucionária particular, Xie e Steven (1993). A desvantagem deste tipo de otimização é o fato de não poder demonstrar matematicamente que o projeto final convergirá para a solução ótima global do problema, Rodríguez (2015). No entanto, quando o método é aplicado de forma apropriada a tendência é à rápida convergência para uma forma ótima ou muito próxima à forma ótima do problema de otimização (Das *et al.*, 2011).

Outro método de otimização bastante utilizado é o Algoritmo Genético (A.G.), desenvolvido por John Henry Holland (1975). Essa técnica envolve um conjunto de soluções aplicando conceitos da evolução natural de Charles Darwin, para produzir conjuntos de soluções cada vez melhores. Holland (1975) desenvolve as seguintes etapas para a execução do método criado: geração da população inicial, avaliação ou aptidão, seleção, cruzamento e mutação. De forma geral, a técnica de algoritmos genéticos desenvolve uma população de soluções para o problema apresentado, dessa forma essas possíveis respostas são analisadas e as mais aptas são selecionadas para uma nova recombinação de soluções, esse processo é repetido até que se atenda a restrição final imposta pelo programador.

O presente projeto visa a aplicação método estrutural evolucionário ESO e o método de algoritmos genéticos como base de nossa metodologia de otimização. Pela sua versatilidade e robustez, será usado o método dos elementos finitos como ferramenta de análise de deformações e tensões. Finalmente, serão mostrados exemplos de aplicação em estruturas treliçadas, vigas, pilares, entre outras estruturas comumente utilizadas na área de engenharia civil. Estudos de caso também serão apresentados com o intuito de mostrar a aplicabilidade da metodologia.

### 13. Cronograma de Atividades:

Nº	Atividades	Duração em meses	Data de início	Data de término
1*	Revisão bibliográfica sobre otimização topológica estrutural e aplicações.	3	01/06/17	31/08/17
2	Implementação computacional do programa base da análise estrutural mediante o uso do MEF.	2	01/06/17	31/07/17
3	Implementação computacional dos métodos de otimização topológica.	3	01/08/17	31/10/17
4	Validação dos modelos implementados através de comparação com métodos analíticos e softwares comerciais.	3	01/11/17	31/01/18
5	Geração de resultados e redação de relatórios.	2	01/02/18	31/03/18
6	Publicação de resultados em artigos científicos e congressos.	2	01/04/18	31/05/18

\* A atividade 1 e 2 serão realizadas simultaneamente entre 01/06/17 e 31/07/17; isto não impede a continuidade da

revisão bibliográfica enquanto estiverem sendo realizadas outras atividades.

#### **14. Referências Bibliográficas (Conforme Normas da ABNT):**

- CABALLERO, S.S. Optimización Estructural y Topológica de Estructuras morfológicamente no definidas mediante algoritmos genéticos. Tese (Doutorado). Universitat Politècnica de Valencia, 2012.
- COOK, R. D, MALKUS, D. S., PLESHA, M. E., WITT, R. J. Concepts and applications of finite element analysis. Wiley, 2002.
- DAS, R.; JONES, R. e XIE, Y.M. Optimal topology design of industrial structures using an evolutionary algorithm. Optimization and Engineering, v. 12, 681–717, 2011.
- FILHO, L. P. P. Um estudo em otimização de topologia: aplicação ao sistema de contraventamento de edifícios. Monografia. UFG, 2015.
- FOX, R. L. Constraint Surface Normals for Structural Synthesis Techniques, AIAA J., v. 3, n.8, p. 1517-18, 1965.
- GIL, F.J.R. Diseño óptimo de micromecanismos tridimensionales con actuación electrotérmica utilizando optimización topológica y unidades de procesamiento gráfico (GPU). Dissertação (Mestrado). Universidad Nacional de Colombia, 2013.
- HAFTKA, R.T. e GURDAL, Z. Elements of Structural Optimization, Third revised and expanded edition. Springer, 1992.
- HOLLAND, J. H. Adaptation in natural and artificial systems. The University of Michigan Press, Ann Arbor, MI, 1975.
- MAXWELL, J. C. On Reciprocal Figures, Frames and Diagrams of Force, Trans. Royal Soc. Edinb., vol. 26/1, 1872.
- MICHELL, A. G. M. The Limits of Economy of Material in Framed Structures, Philosophical Magazine, Series 6, v. 8, p. 589-97, 1904.
- RODRIGUEZ, S.Q. Otimização topológica multiobjetivo de estruturas submetidas a carregamentos termo-mecânicos. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Campinas, 2015.
- SCHMIT, L. A. Structural Design by Systematic Synthesis, Proceedings, 2nd Conference on Electronic Computation, ASCE, New York, p. 105-22, 1960.



XIE, Y.M. e STEVEN, G.P. A simple evolutionary procedure for structural optimization. Computer and Structures, v. 49, 885–896, 1993.

## 15. Orçamento:

### 15.1 Material de Consumo

Especificação	Qtde.	Valor Unitário	Valor Total
	0	0	0
	0	0	0
Total			0

### 15.2 Equipamentos e Material Permanente

Especificação	Qtde.	Valor Unitário	Valor Total
	0	0	0
	0	0	0
Total			0

### 15.3 Serviços de Terceiros – Pessoa Física e Pessoa Jurídica

Especificação	Qtde.	Valor Unitário	Valor Total
	0	0	0
	0	0	0
Total			0

### 15.4 Fontes de Recursos

Discriminação	UNEMAT (Campi e/ou Depto)	Outra fonte	Total
Material de Consumo	0	0	0
Equipamentos e Material Permanente	0	0	0
Serviços de Terceiros e Encargos Diversos	0	0	0
Total		0	0

### 15.5 Cronograma de Desembolso

Elementos de Despesas/Fontes de Recursos	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Total
UNEMAT (Campi e/ou Depto)	0			0
Material de Consumo	0			0
Equipamentos e Material Permanente	0			0
Serviços de Terceiros e Encargos Diversos	0			0
<i>Sub-total</i>	0			0
Outras fontes	0			0

Material de Consumo	0			0
Equipamentos e Material Permanente	0			0
Serviços de Terceiros e Encargos Diversos	0			0
<i>Sub-total</i>	0			0
TOTAL	0			0